

液膜の蒸発に関する研究

著者	佐藤 雅紀
号	370
発行年	1972
URL	http://hdl.handle.net/10097/9106

(2) 回転円盤による方法

が考えられる。垂直平板や傾斜平板による方法は、重力を利用して薄い液膜に広げるものであり、1910年代から多くの研究がなされている。いっぽう回転円盤による方法は、遠心力を利用して薄い円形状の液膜に広げるものであるが、研究の数が少ない。

とくに加熱回転円盤による液膜の蒸発は、液膜が安定しさえすれば蒸発効率も高く、きわめて実用性のある蒸発方式であるにもかかわらずあまり研究がなされていない。そして加熱円盤上の均一蒸発の条件、蒸発の機構、蒸発の迅速性、蒸発面に対する蒸発量、各種液体の蒸発の様式と蒸発器用液体としての適否など未知の点が多い。本研究は、これらの点を明らかにし、実用蒸発器への応用に必要な基礎資料を得ることを目的として、系統的な実験と理論解析を行なったものである。

第2章 回転円盤による液膜の蒸発の機構

本章では、加熱回転円盤による液膜形成と基本的な液膜蒸発の機構について述べてある。すなわち、直径150mmφ、厚さ5mmの透明水晶盤の中心部に蒸留水またはエタノール水溶液を注入し、円盤周辺部を加熱した場合の蒸発現象を影写真撮影した結果にもとづいて、液膜の蒸発機構を論じた。

エタノール水溶液の円形な液膜の影写真の一例を図1に示す。蒸留水の不規則な液膜の影写真の一例を図2に示す。

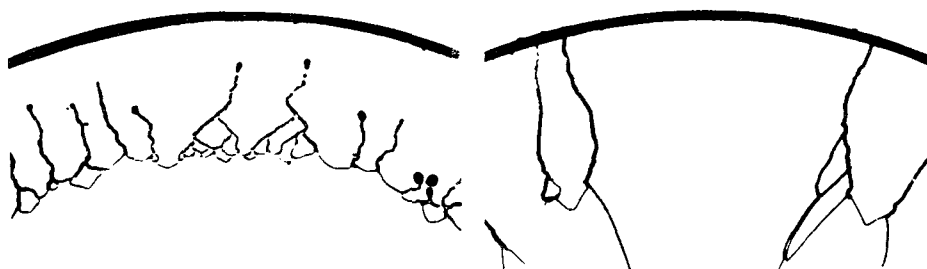


図1. エタノール水溶液の円形な液膜

図2. 蒸留水の不規則な液膜

これから、基本的には蒸発しつつある液膜の形成には2種類あることを明らかにし、それを

- (1) 円形な液膜
- (2) 不規則な液膜

とした。この２種類の液体の膜状広がり条件を液体のぬれの機構から考察した。すなわち、ひろがり力の概念を導入し、水平固体面と液体との接触には常に液体の最大高さが存在することを利用してひろがり力を求め、液膜表面の乱れと関連づけることによりこれを説明した。効率のよい均一蒸発には円形な液膜が適しており、これは円形液膜部での蒸発と液膜周辺から発生したひも状液流とから成ることを明らかにし、ひも状液流には沸騰が存在し、これは核沸騰の範囲にあるとの解釈を示した。さらにひも状液流の発生の機構を液膜表面の乱れと表面張力の勾配（Marangoni effect）および円盤から液膜への熱伝達の関係から解釈し、これを説明した。

またひも状流れの描く形、ひも状流れ間の間隔およびひも状流れの太さ、ひも状流れの長さ、について、円盤の回転数や液体の流量から考察し、蒸発機構についての定性的な解明を得た。

第３章 回転円盤による蒸留水の蒸発現象

液体のうちで最も普遍性のある蒸留水について液膜の蒸発現象を主として円盤の温度分布という観点から定量的に把握した。直径 200 mmφ、厚さ 13 mm のステンレス円盤の中にシース・ヒータをうめ込んで、円盤を下面から電気的に加熱して蒸留水の液膜を形成し、円盤の温度分布を実測した。

円盤の温度分布の一例を図 3 に示す。この結果にもとづいて、ひも状液流が発生する部分の温度（液膜境界温度）は、実験の範囲で沸点およびその直前の温度であることを明らかにし、さらにひも状液流は極大蒸発率点（148℃）の直前までの範囲の温度であることを示した。

また蒸発現象を把握するとき、蒸発負荷が効率のよい蒸発の問題として重要と考えられる。それゆえ液膜半径（ r_b ）に対し、流量による影響、回転数による影響、加熱量による影響を調べ、実験式を導いた。すなわち、 $r_b = 1.62 \times 10^3 \cdot w^{0.81} \cdot \omega^{0.22} \cdot q^{-1.0} [cm]$ ただし、流量：0.11 g/sec $\leq w \leq 0.19$ g/sec、回転数：100 rad/sec $\leq \omega \leq 315$ rad/sec、加熱量：190 cal/sec $\leq q \leq 240$ cal/sec である。

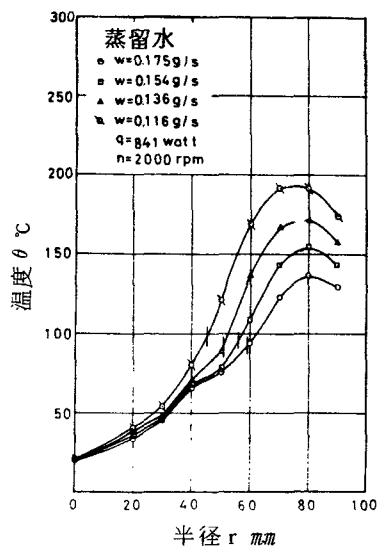


図 3 回転円盤温度分布（蒸留水、 $n = 2000$ rpm）

また伝熱現象を考慮して無次元化し、回転レイノルズ数とヌセルト数の関係を求めた結果、ヌセルト数による液膜の層流域の熱伝達の特徴と意味は異なるが、傾向は類似していることが明らかになった。これを図4に示す。

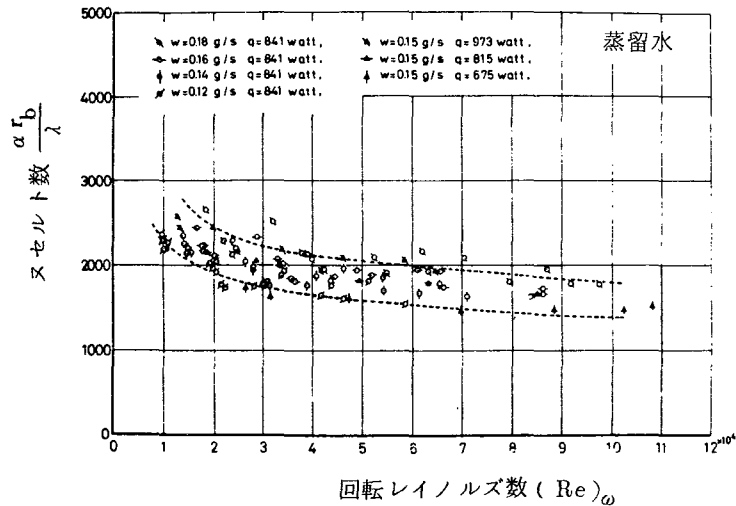


図4 回転レイノルズ数とヌセルト数の関係

第4章 回転円盤による実用燃料の蒸発現象

本章では蒸発式燃焼器への応用を目的として、石油系実用燃料(ガソリン、灯油、軽油、A重油)の蒸発現象を追求した。これらの燃料ではひも状液流はほとんどみられず、液膜は沸点以下で蒸発し終ることを確め、極大蒸発率点以下で蒸発を完了していることを明らかにした。またそれぞれの燃料について円盤の温度分布と液膜半径を測定し、液膜の境界の明確な灯油、軽油については燃焼負荷率と関連をもつ液膜半径の実験式を導き、液膜半径と蒸発量との関係を示した。さらに液膜の写真撮影を広範に行ない、これらの燃料液体の蒸発現象の様式を明らかにするとともに、燃料の重質成分(スラッジ)の析出状態を観察して実用上の考察を行なった。これを各燃料ごとに述べると次のようになる。

4.1 ガソリンの蒸発現象

液膜の蒸発が完了する点の温度すなわち液膜境界温度は、実験の範囲で $110 \sim 150^\circ\text{C}$ であ

ることを明らかにした。すなわち沸点の範囲内にあり、極大蒸発率点（190℃）より低いことを明らかにした。さらに液膜の蒸発現象に対し、回転数による影響を調べ、ガソリンの液膜の蒸発の様式を明らかにし、揮発性のよい蒸留油であるにもかかわらずスラッジが析出することを示した。

4.2 灯油の蒸発現象

液膜境界温度は実験の範囲で130～180℃であり、沸点およびその直前の温度であることを明らかにした。さらに液膜の蒸発現象に対し、流量による影響、回転数による影響、加熱量による影響を広範に調べ、灯油の液膜の蒸発の様式を明らかにした。そして液膜の先端の外周にはごく軽いスラッジが析出することを示し、この析出の度合は、実験した石油系実用燃料のうちでは灯油が最も少なく、この点蒸発器用燃料として有利であるとの解釈を示した。つぎに液膜半径（ r_b ）の実験式はつぎのように表わされることを示した。すなわち、 $r_b = 2.34 \times 10^{-3} \cdot w^{0.63} \cdot \omega^{0.31} \cdot q^{-1.3} [cm]$ 、ただし、流量： $0.06 \text{ g/sec} \leq w \leq 0.09 \text{ g/sec}$ 、回転数： $100 \text{ rad/sec} \leq \omega \leq 315 \text{ rad/sec}$ 、加熱量： $115 \text{ cal/sec} \leq q \leq 145 \text{ cal/sec}$ 、である。

4.3 軽油の蒸発現象

液膜境界温度は実験の範囲で200～250℃で、沸点およびその直前の温度であり、極大蒸発率点（350℃）より低いことを明らかにした。さらに液膜の蒸発現象に対し、流量による影響、回転数による影響、加熱量による影響を広範に調べ、軽油の液膜の蒸発の様式を明らかにした。そして液膜の先端の外周には濃いスラッジが析出することを示した。つぎに液膜半径（ r_b ）の実験式はつぎのようにあらわされることを示した。すなわち、

$$r_b = 1.90 \times 10^{-4} \cdot w^{0.60} \cdot \omega^{0.59} \cdot q^{-1.9} [cm],$$

ただし、流量： $0.025 \text{ g/sec} \leq w \leq 0.055 \text{ g/sec}$ 、
回転数： $100 \text{ rad/sec} \leq \omega \leq 315 \text{ rad/sec}$ 、
加熱量： $155 \text{ cal/sec} \leq q \leq 190 \text{ cal/sec}$ 、である。

4.4 A重油の蒸発現象

液膜境界温度は実験の範囲で300～360℃であり、極大蒸発率点（570℃）より低いことを明らかにした。さらに液膜の蒸発現象に対し、流量による影響、回転数による影響を広範に調べ、A重油の液膜の蒸発の様式を明らかにした。そして、液膜の先端の外周にきわめて多量のスラッジが析出することを示し、この点では蒸発器用燃料としてA重油は適しないと考えられるという解釈を示した。

第 5 章 回転円盤上の液膜の流れと蒸発の理論解析

重力下での液膜に相変化が加わった場合の流れの解析には、有名なヌセルトの研究が古くからあるが、しかし回転円盤上の液膜の流れに蒸発の物質移動が加わった場合の液膜の流れの解析はみあたらない。本章では、周辺加熱の条件において、沸騰を伴わない層流液膜流れを仮定して、液膜の蒸発現象に理論式を導入し、蒸発しつつある液膜の流れのようすを明らかにした。そして、熱伝導率の比較的大きい回転円盤については、理論と実験とがほぼ一致するのを確認した。

この結果、従来まで不明であると考えられていた回転円盤上の蒸発しつつある液膜の速度と、蒸発しつつある液膜の厚さが、概略明らかになるという結果を得た。

第 6 章 結 論

従来まで重力による液膜の研究は数多く行なわれてきたが、遠心力による回転円盤上の液膜の蒸発をとりあげた研究はほとんど行なわれていなかった。本研究では、この液膜の蒸発現象を主として液膜燃焼法の基礎研究という立場から系統的に追求し、つぎの結論を得た。

(1) 蒸留水およびエタノール水溶液に対し、回転円盤上における蒸発しつつある液膜を写真撮影し、この結果にもとづいて液膜の蒸発の機構を定性的に明らかにした。

(2) 蒸留水および石油系実用燃料に対し、液膜を写真撮影することにより、各種液体の蒸発の様式を整理しこれを示した。さらに回転円盤の温度分布を実測し、蒸発が完了する点の温度すなわち液膜境界温度を明らかにし、実用上の知見を得た。

(3) 液膜の境界が明確な液体、すなわち蒸留水、灯油、軽油、に対して、燃焼負荷率と関連をもつ液膜半径の実験式を導き、液膜半径と蒸発量との関係を示した。

(4) 回転円盤上の液膜の蒸発現象に理論式を導入し、蒸発しつつある液膜の流れのようすを明らかにした。

以上によって、回転円盤上の液膜の蒸発の機構が解明され、さらに実用上の蒸発燃焼器への応用に対する基礎的知見を得ることができた。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、終始懇篤な御指導と多くの便宜を与えられた棚沢泰教授（現、名誉教授）に深甚の謝意を表する。さらに、昭和 45 年 4 月以後御指導を賜った永井伸樹助教授に謹んで感謝の意を表する。また、本研究に対して有益な助言を戴いた戸部俊美教授、武山 斌郎教授、大塚芳郎教授に謹んで感謝の意を表する。

審 査 結 果 の 要 旨

固体面上を流れる液膜の蒸発に関しては、物質移動を伴う伝熱の問題として多くの基礎研究が行なわれているが、おもに重力を利用した液膜流れを取扱っている。

加熱回転円板を用いた液膜蒸発は、遠心力による薄膜の形成を利用したもので、蒸発効率も高く、液体蒸発器や蒸発式燃焼器などへの応用としてもっとも実用性のある蒸発方式である。しかしこれに関する研究は少なく、円板上の液膜形成の条件、蒸発機構、円板の温度分布と蒸発の関係、各種液体の蒸発現象の特質、加熱条件や円板材質の影響など不明の点が多い。

本論文は、これらの点を明らかにし、実用蒸発器への応用に必要な知見を得ることを目的として、系統的な実験と理論解析を行なった結果をまとめたもので、全文6章から成っている。

第1章は緒論で、従来の液膜蒸発に関する研究の概要と本研究の目的について述べている。

第2章は、回転円盤による液膜形成と基本的な液膜蒸発の機構について論じている。すなわち透明石英板の中心部に蒸留水およびアルコール水溶液を注入し、円板周辺部を加熱した場合の蒸発現象を写真撮影した結果に基づいて、液体の膜状広がり条件について考察し、液膜蒸発は円形液膜部での蒸発と、液膜周辺から発生したひも状液流の沸騰を伴う蒸発とから成ることを明らかにして、液膜分裂とひもの発生機構について考察を行なっている。さらに円板回転数や液体流量による蒸発機構の変化について述べている。

第3章では、下面を加熱したステンレス鋼円板上での蒸発現象を蒸留水について調べ、円板の温度分布の測定から、液膜温度は液体の沸点以下であることを見出しているが、これは膜状蒸発機構の解明に対して重要な知見を与えるものである。また蒸発負荷と関連する液膜半径を、流量、回転数および加熱量によって実験式で表わし、回転円板上の蒸発が層流範囲の液膜の蒸発に類似のものであることを明らかにしている。

第4章は、蒸発式燃焼器への応用を目的とした石油系液体燃料の蒸発現象について述べている。これらの燃料ではひもの発生がほとんどみられず、液膜は沸点以下で蒸発し終ることを確かめ、それぞれの燃料について円板の温度分布と液膜半径を測定し、燃料の重質成分の析出状態を観察して実用上の考察を行なっている。

第5章では、周辺加熱の条件において、回転円板上の薄膜流れを仮定し、円板表面における液膜への層流熱伝達を仮定した沸騰を伴わない液膜蒸発モデルについて理論解析を行ない、熱伝導率の大きい金属円板では理論と実験がほぼ一致する結果を得ている。

第6章は結論である。

以上本論文は、回転円板による液膜の蒸発に関して、円板上での蒸発機構を解明し、円板の温度分布と液膜蒸発の関係を明らかにし、実用設計上の指針を与えたものであり、液膜蒸発の研究に新しい知見を加え、熱工学ならびに工業に対し寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。